

**Diseño y optimización de mezclas de concreto reforzado con macro-fibras sintéticas para
análisis del comportamiento a flexión**

Wendy Carolina Ariza Ascanio

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

Luis Eduardo Zapata Orduz

Doctor en Ingeniería Civil

Magíster en Ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingeniería Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería civil

Bucaramanga

2018

Dedicatoria

A Dios

Por cada bendición a lo largo de mi carrera, por darme la fortaleza y perseverancia para continuar cada día luchando por mis sueños y permitirme llegar a este momento anhelado; por ponerme siempre buenas personas en mi camino, por las oportunidades y la vida.

A mi familia

Mi hermana Yenny por ser mi apoyo incondicional y ser mi ejemplo a seguir, a Cristina Acosta por darme su amor y entrega, a Freddy Acosta por ser mi amigo, mi consejero y mi fan número uno al alentarme a continuar cada día y ser la mejor, a mi hermano Fabián y mi abuela Cleotilde con quienes crecí y a quienes llevo siempre en mi corazón. A todas y cada una de las personas que siempre creyeron en mí y me dieron su apoyo.

A mis amigos

A Diana, Andrea y familiares, gracias por todo el apoyo en los momentos de adversidad, por su fe en mí y su cariño sincero.

A Sara y María Fernanda, por ser las mejores colegas y amigas que me dio la vida y la UIS, por cada momento de risa y alegría, pero sobre todo por todas las veces en que fueron mi apoyo, mi pañuelo de lágrimas y mi aliento, gracias por siempre creer en mí y motivarme a seguir en cada tropiezo que daba. Las llevo siempre en mi corazón.

A Juliana por ser mi alma gemela, por su cariño, su apoyo y paciencia infinita. Gracias por ser mi hermana y por todas las palabras de aliento y psicología invertida estos años de amistad y a su familia por ser otro hogar para mí.

Finalmente, a MÍ por nunca desfallecer, por siempre creer en Dios, en la familia y los amigos, gracias a mí por cada noche de traspaso, por cada esfuerzo y toda la dedicación puesta en este sueño cumplido.

Agradecimientos

A la Cámara de comercio de Bucaramanga, quien patrocino esta investigación y apoyo cada paso dado para la realización de mi tesis de grado.

A la Universidad Industrial de Santander, alma mater que abrió sus puertas para brindarme el conocimiento necesario para culminar mi carrera.

Al laboratorio de materiales ABP y sus laboratoristas, en especial a la Mechuda y Jaime quienes siempre me brindaron su apoyo y conocimiento en los ensayos requeridos. A Julián Herrera por ser un colega y compañero de trabajo.

A mi director de tesis, por darme la oportunidad y confianza de realizar la investigación y sobre todo a mi compañero Sergio Mora, por cada día de trabajo duro en el laboratorio, sin él no lo habría logrado.

A Dios por la vida, por sus bendiciones, por mi familia y amigos, por la oportunidad de poder estudiar y cumplir mis sueños, Gracias.

Contenido

| | Pág. |
|--|-------------|
| Introducción | 13 |
| 1. Materiales..... | 16 |
| 1.1 Agregado Grueso | 16 |
| 1.2 Agregado Fino | 17 |
| 1.3 Cemento | 18 |
| 1.4 Plastificante..... | 19 |
| 1.5 Acelerante | 19 |
| 1.6 Fibras..... | 20 |
| 2. Metodología | 21 |
| 2.1 Metodología Estadística..... | 21 |
| 2.2 Diseño de Mezclas | 23 |
| 2.3 Proceso de mezclado..... | 25 |
| 2.3.1 Criterio de asentamiento | 25 |
| 2.3.2 Preparación de especímenes | 26 |
| 3. Resultados y discusión..... | 27 |
| 3.1 Resistencia a la compresión | 27 |
| 3.2 Resistencia a flexión | 28 |

| | |
|---|----|
| 3.3 Energía de fractura..... | 32 |
| 3.4 Análisis estadístico..... | 35 |
| 4. Costos por m ³ de mezcla de concreto reforzado con fibra..... | 43 |
| 5. Conclusiones..... | 45 |
| Referencias bibliográficas..... | 47 |

Lista de figuras

| | Pág. |
|--|-------------|
| <i>Figura 1.</i> Análisis granulométrico agregado grueso..... | 17 |
| <i>Figura 2.</i> Análisis granulométrico agregado fino..... | 18 |
| <i>Figura 3.</i> Monofilamento ondulado de polipropileno, S1..... | 21 |
| <i>Figura 4.</i> Fibra de polipropileno fibrilada, T2..... | 21 |
| <i>Figura 5.</i> Enmallado experimental fibra S1. | 22 |
| <i>Figura 6.</i> Enmallado experimental fibra T2. | 23 |
| <i>Figura 7.</i> Ensayo de asentamiento [30 mm], mezcla P1, fibra S1..... | 24 |
| <i>Figura 8.</i> Desviación estándar promedio de la resistencia a compresión a 7 días, fibra S1..... | 28 |
| <i>Figura 9.</i> Desviación estándar promedio de la resistencia a compresión a 7 días, fibra T2..... | 28 |
| <i>Figura 10.</i> Esquema de ensayo, viga simplemente apoyada. Fuente. Autor | 29 |
| <i>Figura 11.</i> Módulos de rotura promedio y desviación estándar a 14 días, fibra S1. | 30 |
| <i>Figura 12.</i> Módulos de rotura promedio y desviación estándar a 14 días, fibra T2. | 30 |
| <i>Figura 13.</i> Fallo P1, presencia de grieta en L/3..... | 31 |
| <i>Figura 14.</i> Fallo P2, presencia de grieta en L/3..... | 31 |
| <i>Figura 15.</i> Módulo de rotura y desviación estándar fibra S1 Vs fibra T2..... | 32 |
| <i>Figura 16.</i> Esquema de evaluación de la energía de fractura. Fuente. Autor..... | 33 |
| <i>Figura 17.</i> Energía de fractura y desviación estándar de los nueve puntos de prueba, fibra S1. . | 33 |

| | |
|--|----|
| <i>Figura 18.</i> Energía de fractura y desviación estándar de los nueve puntos de prueba, fibra T2. . | 34 |
| <i>Figura 19.</i> Matriz reforzada con fibra S1. | 35 |
| <i>Figura 20.</i> Matriz reforzada con fibra T2. | 35 |
| <i>Figura 21.</i> Superficie de respuesta del módulo de rotura a una edad de curado de 14 días, fibra S1. | 39 |
| <i>Figura 22.</i> Gráfica de contorno del módulo de rotura en función del contenido de fibra y retiro de agregado grueso a una edad de curado de 14 días, fibra S1. | 40 |
| <i>Figura 23.</i> Gráfica de contorno de la energía transformada con Log_{10} en función del contenido de fibra y retiro de agregado grueso a una edad de curado de 14 días, fibra T2. | 40 |
| <i>Figura 24.</i> Superficie de respuesta de la energía transformada con Log_{10} a una edad de curado de 14 días, fibra T2. | 41 |
| <i>Figura 25.</i> Curva desplazamiento vs fuerza axial de la mezcla óptima para la fibra S1 | 42 |
| <i>Figura 26.</i> Curva desplazamiento vs fuerza axial de la mezcla óptima para la fibra T2..... | 42 |
| <i>Figura 27.</i> Curva desplazamiento vs fuerza axial de mezcla de concreto simple. Fuente. Autor | 43 |

Lista de tablas

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. <i>Características físico-químicas cemento portland (Uso General)</i> | 18 |
| Tabla 2. <i>Cantidad de material de mezclas y registro de asentamiento (S1)</i> | 24 |
| Tabla 3. <i>Cantidad de material de mezclas y registro de asentamiento (T2)</i> | 25 |
| Tabla 4. <i>Análisis ANOVA Minitab VI7® para módulo de rotura a 14 días fibra (S1)</i> | 37 |
| Tabla 5. <i>Análisis ANOVA Minitab VI7®. Modelo no depurado de los factores, para la Energía [J] transformada con Log10 a 14 días fibra (T2)</i> | 38 |
| Tabla 6. <i>Análisis ANOVA Minitab VI7®. Modelo depurado de los factores, para la Energía [J] transformada con Log₁₀ a 14 días fibra (T2)</i> | 38 |
| Tabla 7. <i>Precio m³ concreto reforzado con fibra S1</i> | 44 |
| Tabla 8. <i>Precio m³ concreto reforzado con fibra T2</i> | 44 |
| Tabla 9. <i>Precio m³ concreto simple, mezcla P0</i> | 44 |

Resumen

Título: Diseño y optimización de mezclas de concreto reforzado con macro-fibras sintéticas para análisis del comportamiento a flexión*

Autor: Wendy Carolina Ariza Ascanio**

Palabras clave: Concreto reforzado con fibras, Fibras de polipropileno, Módulo de rotura, Ensayo a flexión, Método de superficie de respuesta, Optimización de mezcla.

Descripción

Hoy en día las fibras de polipropileno, nylon, polietileno, metal, entre otras, que son inocuas frente a la salud humana, se emplean con fines similares en la producción de prefabricados, tanto en la prefabricación pesada (pilotes, postes, dovelas, vigas) como en la prefabricación liviana (ladrillos, láminas). El objeto de esta investigación es obtener una optimización en los diseños de mezcla de concreto reforzado con dos tipos de macro-fibras de polipropileno para la industria del prefabricado, buscando alcanzar una mayor ductilidad en su comportamiento en comparación a la del concreto simple, observar los efectos de la fracción de volumen de fibra sintética en las propiedades de fractura del concreto cuando es solicitado a flexión; esta medición se hizo con la energía de fractura y la longitud de los tipos de fibra. Mediante ensayos a flexión a una edad de maduración de 14 días, se obtuvieron los módulos de rotura del concreto fibroreforzado. El diseño estadístico empleado fue del tipo central compuesto junto con un factorial 2^k con dos niveles y un análisis de superficie de respuesta que resultó significativo empleando un $\alpha = 0.10$ para los factores estudiados los cuales varían entre 0% y 1% en volumen para la inclusión de fibra y entre el 0% y 20% para el retiro de agregado grueso (con respecto al volumen total de la mezcla). Las diversas mezclas de concreto se realizaron con una relación constante de agua/cemento = 0.70 y 300 kg/m³ de cemento. Teniendo como base de comparación una mezcla de concreto convencional, los efectos del trabajo a tracción de las fibras se hacen notorios, observando en promedio de ambas fibras, un aumento del 64% en el módulo de rotura (concreto simple vs concreto fibroreforzado).

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz, Doctor en Ingeniería Civil, Magíster en Ingeniería de Materiales

Abstract

Title: Design and optimization of concrete mixtures reinforced with synthetic macro-fibers for analysis of flexural behavior*

Autor: Wendy Carolina Ariza Ascanio**

Keywords: Fibre reinforced concrete, Polypropylene fiber, modulus of rupture, bending test, Response surface method, Mix optimisation

Description

Nowadays the fibers of polypropylene, nylon, polyethylene, metal, among others, which are innocuous against human health, are used for similar purposes in the production of prefabricated, both in heavy prefabrication (piles, posts, voussoirs, beams) as in light prefabrication (bricks, sheets). The object of this research is to obtain an optimization in the designs of reinforced concrete mix with two types of polypropylene macro-fibers for the precast industry, seeking to achieve a greater ductility in its behavior compared to that of simple concrete, observe the effects of the volume fraction of synthetic fiber on the fracture properties of concrete when it is requested to flex; This measurement was made with the fracture energy and the length of the fiber types. By means of bending tests at a maturation age of 14 days, the fracture modules of the fibro-reinforced concrete were obtained. The statistical design used was of the central type composed together with a factorial 2k with two levels and a response surface analysis that was significant using an $\alpha = 0.10$ for the studied factors which vary between 0% and 1% in volume for inclusion of fiber and between 0% and 20% for the removal of coarse aggregate (with respect to the total volume of the mixture). The various concrete mixtures were made with a constant water / cement ratio = 0.70 and 300 kg / m³ of cement. Based on a comparison of a conventional concrete mixture, the effects of the tensile work of the fibers become evident, observing on average of both fibers, a 64% increase in the modulus of rupture (simple concrete vs. fiber reinforced concrete).

* Degree work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz, Doctor in Civil Engineering, Master in Materials Engineering

Introducción

El concreto es el material de construcción más importante y su consumo está aumentando en todos los países y regiones del planeta (Brandt, 2008, págs. 3–9). La principal desventaja del concreto es su fragilidad, es decir, tiene baja resistencia a la tracción y escasa resistencia a la abertura de la grieta y su propagación. En el desarrollo de materiales similares al concreto, el refuerzo con fibras dispersas juega un papel importante (Brandt, 2008). Las macro-fibras están destinadas a prevenir la fisuración en estado endurecido, a reducir el ancho y la propagación de la fisura si ésta se presenta y a permitir el adecuado funcionamiento de la estructura fisurada (Gopalaratnam & Shah, 1986, págs. 117-126). Las macro-fibras se incluyen en el concreto para aumentar la tenacidad del material, es decir, para hacer que las estructuras, incluso después del agrietamiento de la matriz, puedan seguir siendo cargadas. El concreto fibro-reforzado le permite a la estructura, después de la fisuración de la matriz cementicea, continuar “absorbiendo” carga (Hermida, Garzón, & Lamilla, 2006, págs. 4-9).

El refuerzo estructural está destinado a controlar y asumir las cargas externas (estructurales) para las que se diseñó el elemento (momentos, cortantes, torsión). Sin embargo, los esfuerzos generados por fenómenos tales como retracción o ciclos de humedecimiento y secado, los ingenieros estructurales los han resuelto usualmente empleando cuantías adicionales de refuerzo o mallas electrosoldadas (I. M. del C. y el C. IMCYC., 2007, pág. 70). En estado endurecido la malla electrosoldada es más eficiente que en estado plástico, puesto que existe una mejor transmisión de esfuerzos a lo largo de la sección del elemento de modo que la malla puede asumir rápidamente esfuerzos inducidos por cambios hídricos o cambios térmicos, generados en la superficie (I. M.

del C. y el C. IMCYC., 2007).

La adición de fibras afecta las propiedades plásticas y el estado endurecido de los morteros y de los concretos (Destree & Naaman, 2007, págs. 16–19). Dependiendo del material, longitud, diámetro, geometría, deformación, y la tasa de adición de la fibra, diversas propiedades son ganadas, notablemente, el control del agrietamiento por encogimiento plástico, la resistencia al impacto, y la tenacidad o ductilidad. Un aporte importante en esta acción mecánica, es la tenacidad mostrada en el comportamiento post-agrietamiento; es en la flexión desde el punto de vista mecánico donde las fibras tienen un mayor efecto que en la compresión y la tracción (Van Chanh, 2005 , págs. 108-116)

En este estudio se implementaron macro-fibras de polipropileno, material el cual es hidrofóbico. Fueron implementadas dos tipos de fibras: un monofilamento de fibra (S1) y una fibrilada (T2), la cual en estado fresco de la mezcla tiende a separarse en filamentos. Esta inclusión genera una pérdida en la trabajabilidad y la consistencia del concreto (Spadea & Frigione, 1987, págs. 173–185) (Hasaba, Kawamura, Koizumi, & Takemoto, 1984, págs. 187–196) reducción que se evidencia especialmente en las de mayor longitud y las mezclas con alto contenido de fibra (González Salcedo, 2013) (Bentur & Mindess, 2007, pág. 60). La reducción de la trabajabilidad se puede compensar mediante adición de aditivos, por lo cual se hizo necesario el uso de hasta un 2% de plastificante respecto al material cementante, para controlar el asentamiento y trabajabilidad. Parar efectos de la investigación, las fibras se codificaron S1 y T2 de forma aleatoria, ya que el objeto del estudio es técnico-científico y no comercial, por tal motivo no se presentan los nombres de los distribuidores comerciales.

La presente investigación implementó volúmenes de fibra por m^3 de concreto entre $0 \text{ kg}/m^3$ y $12 \text{ kg}/m^3$ y retiro de agregado grueso entre el 0% y 20%. Inicialmente, a partir de un análisis

estadístico denominado diseño central compuesto (Gutiérrez-Pulido & De la Vara-Salazar, 2008), con un análisis del tipo factorial 2^k ($k = 2$ factores) se obtiene una plantilla de diseños que comprende todas las diferentes mezclas de concreto a realizar junto con sus réplicas para ajustar el sistema a un modelo estadístico, obteniendo como resultado un comportamiento significativo en la curvatura de la superficie de respuesta, para determinar así una mezcla optimizada bajo criterios del módulo de rotura a una edad de maduración del concreto de 14 días. Los especímenes ensayados fueron viguetas de 500*150*150 [mm] y fueron ensayadas a flexo-tracción en la máquina universal de ensayos (MTS modelo 318.50). Todos los experimentos fueron realizados empleando relación agua/cemento (a/c) constante de 0.70 según criterio de la investigación. Como resultado, se lograron diseños de mezcla con los cuales se obtuvo un concreto reforzado con macrofibra sintética con módulo de rotura mayor que el de un concreto simple en un 65%, esto se logró usando una de adición de 0.85% de fibra S1 y un 63 % de incremento empleando un 0.65 % de fibra T2, con lo cual se hace notoria la incidencia de la inclusión de fibras sintéticas en la matriz cementicea al aumentar la resistencia a flexión del concreto.

1. Materiales

Con el fin de lograr buenos resultados en este estudio, todos los materiales utilizados fueron previamente caracterizados bajo los requerimientos de las Normas Técnicas Colombianas (NTC), realizando réplicas de cada uno de los ensayos para tener así una seguridad en los resultados. De igual manera, todos los materiales se mantuvieron en condiciones ambientales constantes para que sus propiedades físicas no tuvieran modificación alguna.

1.1 Agregado Grueso

El agregado grueso usado en la presente investigación fue obtenido de la cantera INGESAN (Bucaramanga, Colombia), llamado en la investigación CAg. Tiene un tamaño máximo nominal de 12.5 mm (Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC., 2007), gravedad específica de 2.95, capacidad de absorción de 1.94% (Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC., 1995), peso unitario seco de 1628 kg/m^3 y un contenido de humedad de 0.3% (Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC., 1994). El análisis granulométrico realizado según la NTC 174 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC., 2000) se encuentra registrado como se muestra en la Figura 1.

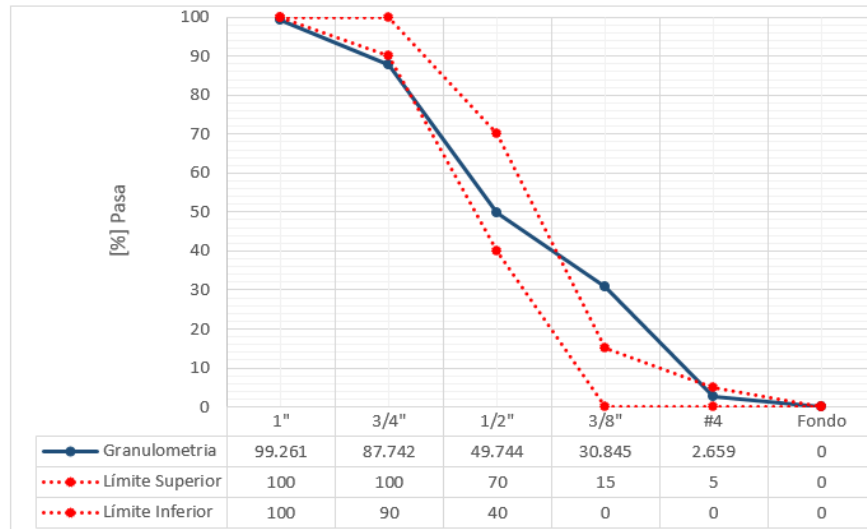


Figura 1. Análisis granulométrico agregado grueso.

1.2 Agregado Fino

El agregado fino utilizado fue obtenido de la cantera de INGESAN (Bucaramanga, Colombia), con un módulo de finura de 2.2, gravedad específica de 2.48 capacidad de absorción de 7.39% (Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC., 1995) y contenido de humedad del 0.4% y un contenido de materia orgánica aceptable, siendo este 3 según la escala de Gardner (INVIAS, 2007, págs. 6–8). El análisis granulométrico realizado según la NTC 174 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC, 2007) se encuentra registrado en la Figura 2.

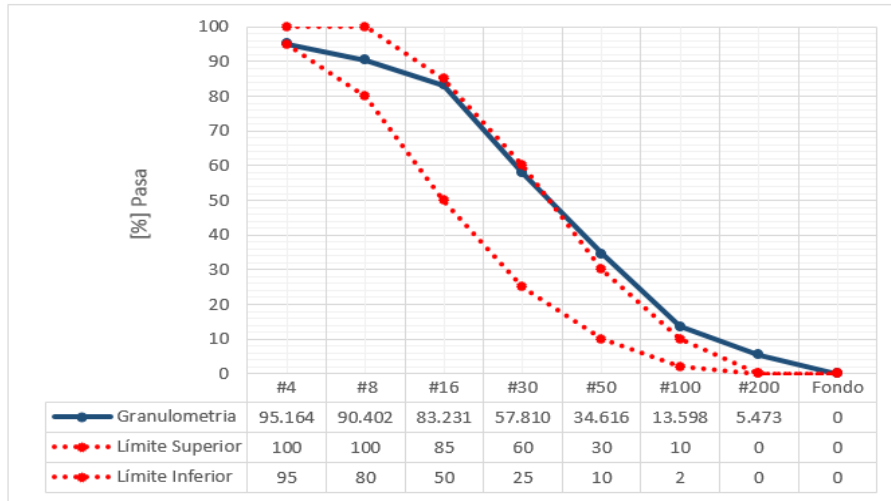


Figura 2. Análisis granulométrico agregado fino.

1.3 Cemento

Las mezclas se realizaron con cemento Portland tipo I (Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC, 2014) con un peso específico de 2.95 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas, 2011). En la Tabla 3 se muestran algunas de sus características fisicoquímicas entregadas por la empresa productora.

Tabla 1.

Características físico-químicas cemento portland (Uso General).

| Composición Química Cemento Portland | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|------|
| Composición Química [%] | SiO ₂ | 21.4 |
| | Al ₂ O ₃ | 6.17 |
| | Fe ₂ O ₃ | 3.23 |

Tabla 1. *Continuación*

| Composición Química Cemento | |
|------------------------------------|------------------------|
| Portland | |
| | CaO 44.75 |
| | MgO 2.43 |
| | SO ₃ 2.52 |
| Composición | Na ₂ O 1.05 |
| Química [%] | K ₂ O 0.76 |
| | P.F 9.16 |
| | Cal Libre 1.31 |
| Gravedad Específica 2.95 | |

Fuente. Planta Caracolito, Cemex, Colombia.

1.4 Plastificante

El Plastificante utilizado es una solución acuosa de polihidroxiolos, carbohidratos y sales de calcio tipo A. El material posee gravedad específica de 1.26 y 42.0% de contenido sólido (Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC, 2008), el cual se determinó secando en horno a temperatura ± 110 °C una determinada cantidad de la sustancia. Este producto está diseñado comercialmente como un reductor de agua de rango medio o como reductor de cemento.

1.5 Acelerante

El acelerante usado es una solución ligeramente acuosa, con dosificación recomendada por el fabricante entre 1 y 4% del peso del material cementante. El material posee gravedad específica

de 1.44 y 64.0% de contenido sólido (Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC, 2008). Este producto está diseñado comercialmente como un acelerante de fraguado y promueve el desarrollo de resistencias tempranas por lo que es muy utilizado en la industria de la prefabricación.

1.6 Fibras

Las macro-fibras estudiadas son de polipropileno, un material hidrofóbico; estas se encuentran disponibles en la industria nacional. La primera codificada S1 (Figura 3), para uso de esta investigación, es un monofilamento ondulado con gravedad específica de 0.92, con una longitud de 65 mm. Esta fibra no presenta una relación de aspecto (L/D) determinada por el fabricante, ya que no tiene un diámetro constante al tener una estructura interna estriada. Y la segunda fibra codificada T2 (Figura 4), es de tipo fibrilada con gravedad específica de 0.91, con longitud de 38 mm y una relación de aspecto de 39/79. Ambas tienen aproximadamente un punto de fusión de 170°C (Cerezo, 2012, págs. 1–22). La fibra S1, fue usada en un dominio entre 0% y 1% de inclusión y la segunda T2 con un dominio de uso entre el 0% y el 0.8% del volumen total de la mezcla según recomendaciones de los fabricantes, por lo tanto, se establecieron internamente estos rangos a investigar.



Figura 3. Monofilamento ondulado de polipropi-leno, S1.



Figura 4. Fibra de polipropileno fibrilada, T2.

2. Metodología

2.1 Metodología Estadística

Esta investigación se realizó para el estudio de dos diferentes tipos de macro-fibras sintéticas, mediante la metodología de experimentos (del inglés Desing of Experiments, DOE) con un diseño tipo central compuesto (Central Composite Desing, CCD), usando un análisis de varianza

(Analysis of Variance, ANOVA) y haciendo uso de la herramienta de superficie de respuesta (Bentur & Mindess, 2007), para hacer una optimización en los parámetros estudiados: inclusión de fibra (eje X_1) y retiro agregado grueso (eje X_2) (ver Figuras 5 y 6). Esta técnica se usa para refinar el modelo una vez se hayan determinado los factores incidentes en el experimento, también porque el plan de diseño requiere de un experimento secuencial, el diseño estadístico empleado fue del tipo Central Compuesto (Bentur & Mindess, 2007) con un diseño factorial 2^k (Gutiérrez-Pulido & De la Vara-Salazar, 2008). Para este propósito se usó como herramienta computacional estadística, el software *Minitab v. 17*®, obteniéndose un total de 26 puntos de mezclas aleatorizadas en las corridas experimentales según el programa para cada una de las fibras, las cuales fueron nombradas P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 y P8, cada uno de estos con 2 réplicas y el punto P9 con 10 (ver Figura 5 y 6). En total fueron 26 vigas de concreto reforzado con macro-fibras las ensayados a tracción por flexión para cada uno de los tipos de fibras estudiados.

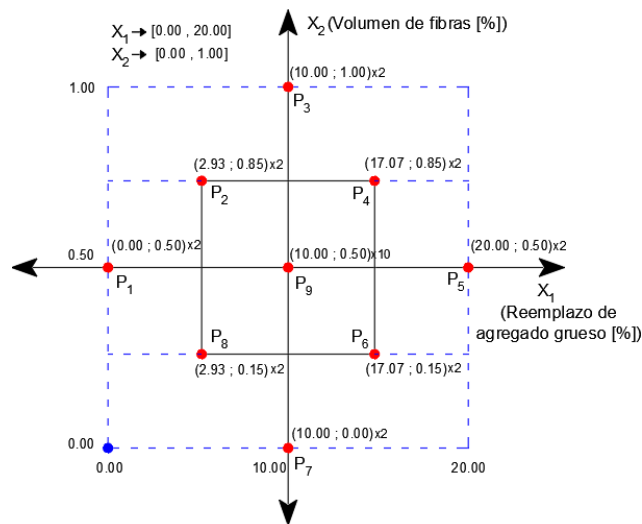


Figura 5. Enmallado experimental fibra S1.

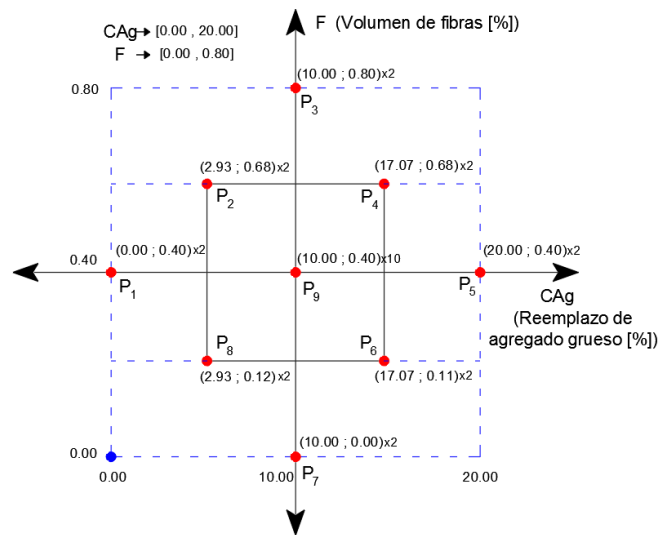


Figura 6. Enmallado experimental fibra T2.

2.2 Diseño de Mezclas

Teniendo como referencia el método volumétrico propuesto por el *American Concrete Institute* (ACI) en el documento ACI 211.1-80 por el método de volúmenes absolutos (Minitab 17 Statistical Software, 2017) (ACI 211.1, 2007), se realizó en primer lugar el diseño de mezcla de control, denominada P0 un concreto convencional con un $f'c$ a 28 días de 21 MPa, el cual servirá como punto de comparación con los nueve diferentes puntos de mezcla para cada una de los tipos de fibra, la cual tuvo las siguientes cantidades; cemento 300 [kg/m³], agregado grueso 959.6[kg/m³], agregado fino 721.1[kg/m³], agua 202.2[kg/m³], plastificante 3.57[kg/m³]; el slump presentado fue de 70 [mm]. Con el fin de estudiar el comportamiento del concreto reforzado con fibras, se realizaron 9 diferentes diseños de mezcla ejecutadas en el laboratorio según el orden aleatorio arrojado por el Software Minitab (Minitab 17 Statistical Software, 2017); como se observa en la Figura 7, una de las grandes dificultades de los ensayos fue la pérdida del asentamiento de la

mezcla una vez fueron adicionadas las fibras (Bentur & Mindess, 2007). Problemática que se solucionó utilizando una dosis adecuada de plastificante, la cual varió entre 0.5% y 2.0% respecto al material cementante, porcentaje que resultó de pruebas de ensayo y error en el laboratorio. En las Tablas 2 y 3 se observan las cantidades a pesar en campo por m^3 de cada uno de los componentes del concreto, también se puede apreciar el asentamiento en los puntos de mezclas (P1-P9), dónde los valores son bajos para las mezclas que tienen mayor cantidad de fibras.



Figura 7. Ensayo de asentamiento [30 mm], mezcla P1, fibra S1.

Tabla 2.

Cantidad de material de mezclas y registro de asentamiento (S1).

| Punto (%CAg - %F) | Cemento [kg/m ³] | Agregado Fino [kg/m ³] | Agregado Grueso [kg/m ³] | Agua [kg/m ³] | Fibra [kg/m ³] | % Plastificante | Slump [mm] |
|----------------------|---------------------------------|--|--|------------------------------|-------------------------------|--------------------|------------|
| P1 (0.00 - 0.50) | 300 | 820.6 | 930.7 | 200.6 | 4.6 | 1.0 | 30 |
| P2 (2.93 - 0.85) | 300 | 772.9 | 883.8 | 200.6 | 7.8 | 1.0 | 50 |
| P3 (10.00-1.00) | 300 | 1075.0 | 661.9 | 200.7 | 9.2 | 2.0 | 30 |
| P4 (17.07-0.85) | 300 | 1268.4 | 471.8 | 200.7 | 7.8 | 1.5 | 30 |
| P5 (20.00-0.50) | 300 | 1356.2 | 393.0 | 200.6 | 4.6 | 2.0 | 30 |
| P6 (17.07-0.15) | 300 | 1287.1 | 471.8 | 200.6 | 1.4 | 2.0 | 40 |
| P7 (10.00-0.00) | 300 | 970.1 | 700.9 | 202.0 | 0.0 | 1.0 | 70 |
| P8 (2.93 - 0.15) | 300 | 908.4 | 851.9 | 200.6 | 1.4 | 1.0 | 40 |
| P9 (10.00-0.50) | 300 | 1088.4 | 661.9 | 200.6 | 4.6 | 1.5 | 30 |

Tabla 3.

Cantidad de material de mezclas y registro de asentamiento (T2).

| Punto (%CAg - %F) | Cemento [kg/m ³] | Agregado Fino [kg/m ³] | Agregado Grueso [kg/m ³] | Agua [kg/m ³] | Fibra [kg/m ³] | % Plastificante | Slump [mm] |
|----------------------|---------------------------------|--|--|------------------------------|-------------------------------|--------------------|------------|
| P1 (0.00 - 0.40) | 300 | 710.5 | 959.7 | 202.9 | 3.6 | 0.5 | 30 |
| P2 (2.93 - 0.68) | 300 | 776.4 | 883.8 | 202.9 | 6.2 | 0.5 | 80 |
| P3 (10.00-0.80) | 300 | 949.3 | 700.9 | 203.0 | 7.3 | 1.0 | 30 |
| P4 (17.07-0.68) | 300 | 1128.1 | 517.9 | 203.0 | 6.2 | 1.0 | 40 |
| P5 (20.00-0.40) | 300 | 1208.0 | 442.1 | 203.0 | 3.6 | 1.0 | 30 |
| P6 (17.07-0.11) | 300 | 1142.3 | 517.9 | 203.0 | 1.0 | 1.0 | 120 |
| P7 (10.00-0.00) | 300 | 969.2 | 700.9 | 202.9 | 0.0 | 0.5 | 100 |
| P8 (2.93 - 0.12) | 300 | 790.3 | 883.8 | 202.9 | 1.1 | 0.5 | 140 |
| P9 (10.00-0.40) | 300 | 959.2 | 700.9 | 203.0 | 3.6 | 0.5 | 100 |

2.3 Proceso de mezclado

Todas las mezclas se realizaron de manera mecánica en una mezcladora con una capacidad de 360 litros durante un tiempo de 10 minutos, en este proceso se mezclaron los materiales finos como el cemento y la arena por un tiempo de 2 minutos hasta lograr una mezcla homogénea, luego fue adicionado el grueso, la mitad de la cantidad de agua junto con el plastificante, esto con un tiempo de mezclado de 2 minutos, seguidamente las fibras y posteriormente el resto del agua durante 6 minutos. Permitiendo mezclar bien la mezcla, subiendo y bajando el eje del trompo hasta conseguir una composición homogénea entre los materiales.

2.3.1 Criterio de asentamiento. Para verificar la trabajabilidad de la mezcla se realizó un ensayo de asentamiento (Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC, 1992) 3 minutos después del proceso de mezclado. Esto con el fin de observar la incidencia de la incorporación de las fibras en la mezcla, lo cual, según literatura (Brandt, 2008), refiere que hay una disminución

del asentamiento del concreto. Para garantizar la fluidez de las mezclas, fue necesario el uso de un aditivo plastificante, el cual le generó la trabajabilidad necesaria a la hora de fundir las vigas. Observar las Tablas 2 y 3 para los valores de asentamiento para los diferentes puntos y tipo de fibra.

2.3.2 Preparación de especímenes. El proceso de encofrado para los cilindros fue realizado según las normas NTC 1377-3512 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC., 2010) (Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC, 2014) haciendo una compactación de 3 capas cada una con 25 golpes y vibrado manual al final (Norma Técnica Colombiana NTC 454, 2011). La dimensión de los cilindros ensayados es de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, estos para hacer un control de la resistencia de las mezclas, las vigas para los ensayos a flexión tomaron un proceso de colocado según la norma NTC 2871 (Incontec, 2005) (Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC, 2014) realizando el vaciado en 2 capas cada una con 64 golpes de compactación. Después de 24 horas de fraguado, las muestras fueron llevadas a una pila de curado con una temperatura de 21 ± 2 °C (I. N. V. E. – 414 – 07, 2000, págs. 1–6) hasta el momento de la prueba de compresión uniaxial a 7 días para el control del diseño de mezcla, y el ensayo a flexión a 14 días para determinar su resistencia según el módulo de rotura de las mismas conforme a la NTC 2871 (Incontec, 2005) (Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC, 2014), en total fueron 56 vigas ensayadas incluyendo las de concreto simple.

3. Resultados y discusión

Todas las pruebas se llevaron a cabo para determinar la dosis óptima de contenido de fibra y lograr una mayor efectividad en su refuerzo al concreto simple, analizar la capacidad de la fibra sintética en el incremento de la energía de fractura y la ductilidad con respecto a la fracción de volumen de fibra y su relación de aspecto para cada caso.

3.1 Resistencia a la compresión

Una vez puestas las muestras en curado luego de su fabricación, se hace el fallo a compresión uniaxial en cilindros para tener idea de su resistencia a 7 días. Las fibras no tienen un aumento significativo en la resistencia a compresión (Bayramov, Taşdemir, & Taşdemir, 2004, págs. 665–675), este ensayo solo se realiza para tener un control de mezcla, los resultados se muestran en las Figuras 8 y 9.

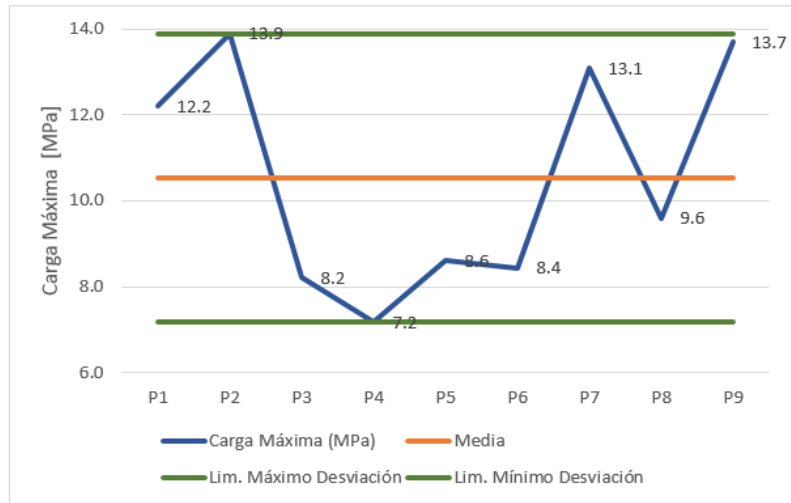


Figura 8. Desviación estándar promedio de la resistencia a compresión a 7 días, fibra S1.

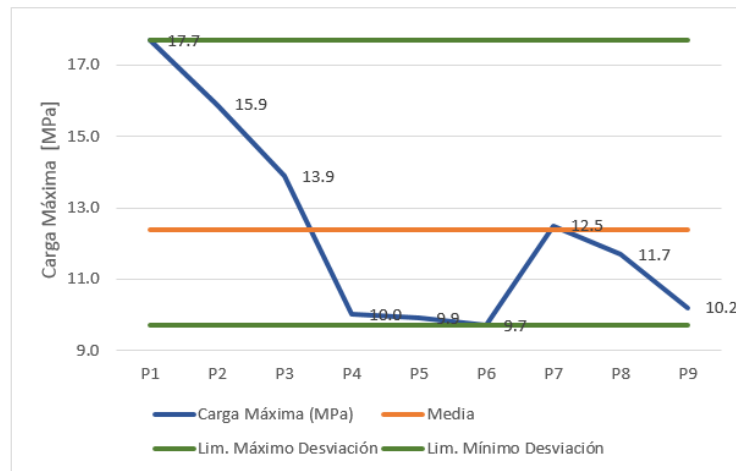


Figura 9. Desviación estándar promedio de la resistencia a compresión a 7 días, fibra T2.

3.2 Resistencia a flexión

Los especímenes ensayados a flexión son vigas de 500*150*150 [mm], las cuales fueron realizadas bajo la norma NTC 2871 (Incontec, 2005) (Instituto Colombiano de Normas Técnicas,

ICONTEC, 2014) y falladas a 14 días en la máquina universal de ensayos MTS. La cual hace registro de la carga aplicada y la deflexión de la viga con una velocidad de ensayo de 0.05 [mm/s], velocidad dictada por la NTC 2871. Las deflexiones se midieron simultáneamente con dos transductores de desplazamiento con variables lineales LVDT. Todas las vigas fueron cargadas en los tercios de la luz según NTC 2781 (Incontec, 2005) (Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC, 2014) la cual establece las distancias entre apoyos y el cálculo del módulo de rotura según donde se presente la grieta, ya que la fractura inició en todos los casos dentro del tercio medio de la luz libre como se aprecia en las Figuras 13 y 14, el módulo de rotura se calculó bajo la siguiente ecuación (1), según las estipulaciones de la norma NTC 2871 (Incontec, 2005) (Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC, 2014) ver Figura 10:

$$R = \frac{P * l}{b * d^2} \quad (1)$$

Dónde, R es el módulo de rotura en [MPa], P la carga máxima aplicada por la máquina de ensayo en [N], l la longitud libre entre apoyos inferiores en [mm], b y d son el ancho y espesor promedio del espécimen en [mm].

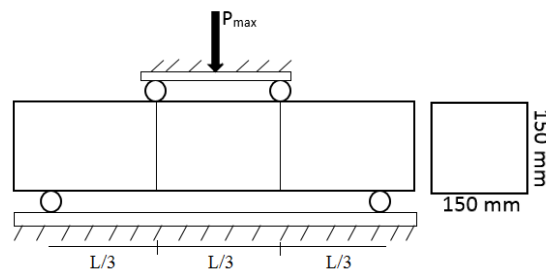


Figura 10. Esquema de ensayo, viga simplemente apoyada. Fuente. Autor

Una vez fueron recolectados los datos de los ensayos, 26 en total por cada tipo de fibra, se recopilaron en las Figuras 11 y 12, mostrando promedios de los módulos de rotura en [MPa] para cada uno de los puntos ensayados junto con sus respectivas desviaciones estándar.

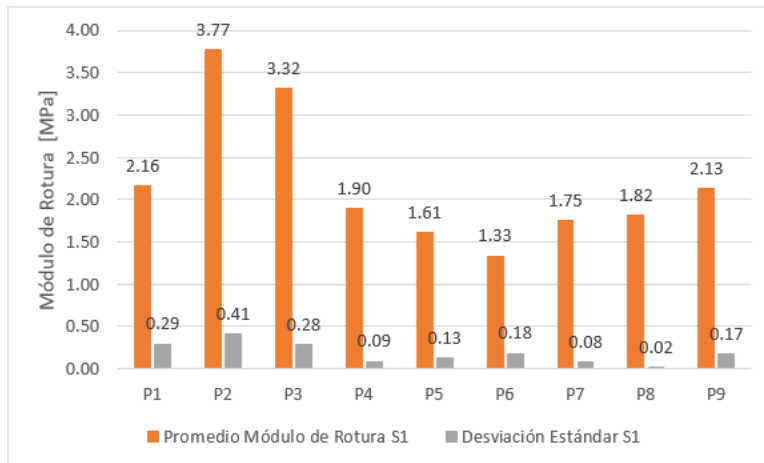


Figura 11. Módulos de rotura promedio y desviación estándar a 14 días, fibra S1.

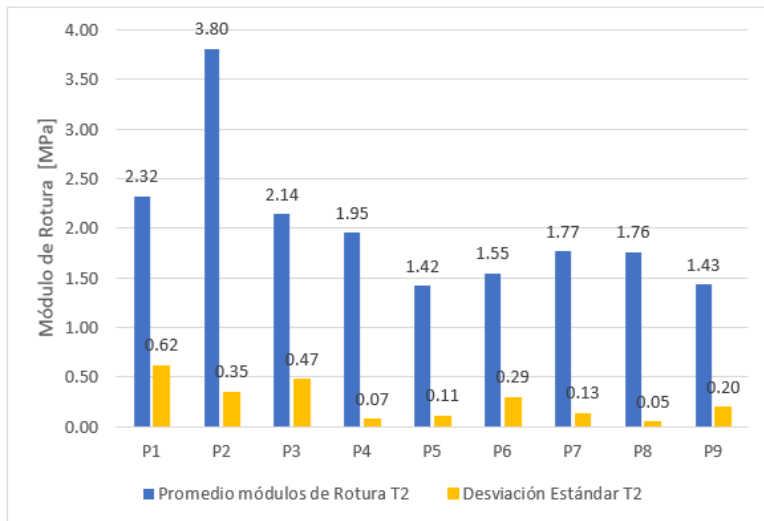


Figura 12. Módulos de rotura promedio y desviación estándar a 14 días, fibra T2.

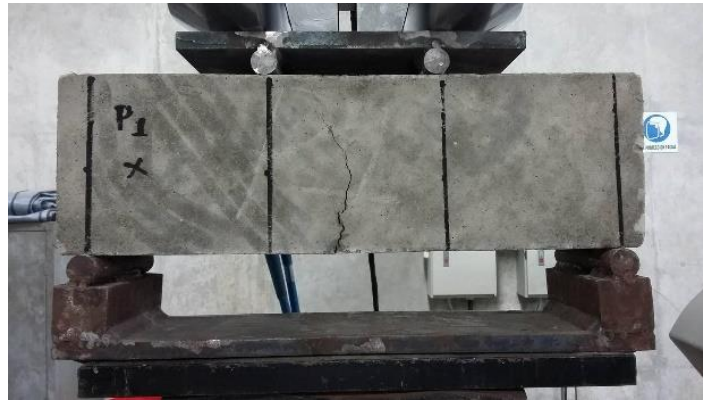


Figura 13. Fallo P1, presencia de grieta en $L/3$.



Figura 14. Fallo P2, presencia de grieta en $L/3$.

La fibra ejerce un mecanismo de puenteo, con el fin de transmitir esfuerzos en el concreto agrietado y proporcionarle capacidad de seguir recibiendo carga sin fallar aun en una condición agrietada, sin fallar; además de este mecanismo de puenteo, la longitud de la fibra tiene una acción en el control de la macro fisura (González Salcedo, 2013), las fibras hacen sustancialmente un incremento de la ductilidad post-agrietamiento o absorción de energía del material (Spadea & Frigione, 1987). Los ensayos en el laboratorio se llevaron a cabo hasta que no resistieran carga las vigas, gracias a las gráficas de fuerza axial versus desplazamiento, se observa el punto de falla del

concreto y el trabajo de las fibras soportando carga como se observa en las Figuras 13 y 14.

Se puede observar en la Figura 15, el módulo de rotura promedio para cada punto de prueba y la desviación estándar de las fibras, donde gráficamente se observa como la fibra S1 envuelve a T2 con mayores resultados en los módulos de rotura.

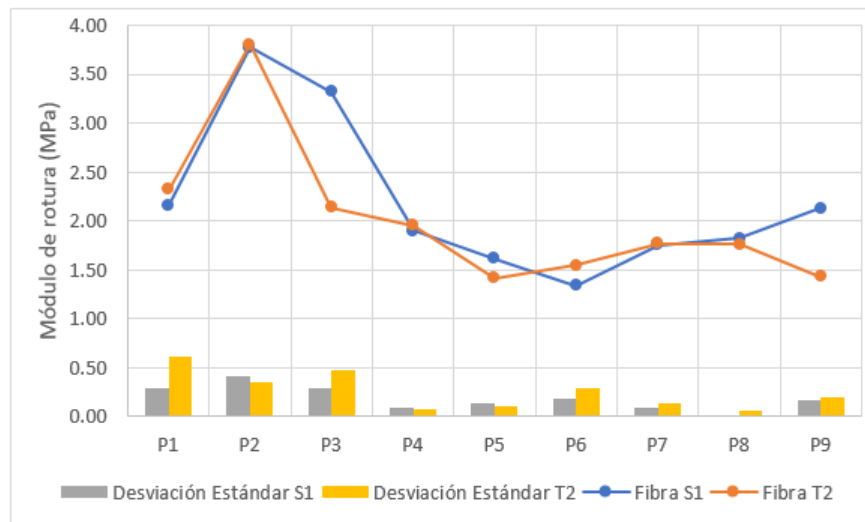


Figura 15. Módulo de rotura y desviación estándar fibra S1 Vs fibra T2.

3.3 Energía de fractura

Uno de los principales papeles de la fibra en el concreto, es proporcionar un aumento en la energía requerida para la fractura, lo que conlleva al proceso de detención de las grietas. La energía de fractura, es la energía necesaria para que una grieta se dé por completo. Esta medida dada como tenacidad se calcula como el área bajo la curva de carga versus deflexión (Spadea & Frigione, 1987) (Bentur & Mindess, 2007) como se aprecia en la Figura 17 y 18 siguiendo el esquema de la Figura 16, se muestra la energía en Joules para cada punto de prueba junto con la desviación estándar presentada.

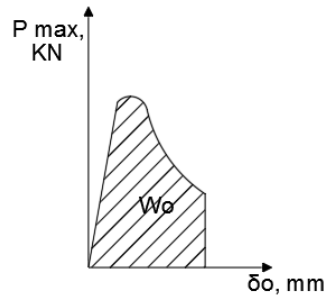


Figura 16. Esquema de evaluación de la energía de fractura. Fuente. Autor

Usando una herramienta computacional como lo es *Matlab R2017b* (MATLAB version 7.10.0., 2017), se logró determinar esta área bajo la curva para cada uno de los 56 especímenes (incluyendo los puntos P0) concreto simple, se puede notar como en los puntos donde la fracción de fibra es mayor (ver Tablas 2 y 3 porcentajes de fibra), se aprecia un aumento de la energía. Este aumento en la energía de fractura fundamentalmente se da por el aumento en el volumen de fibras de mayor longitud que forman puente en la grieta propagada.

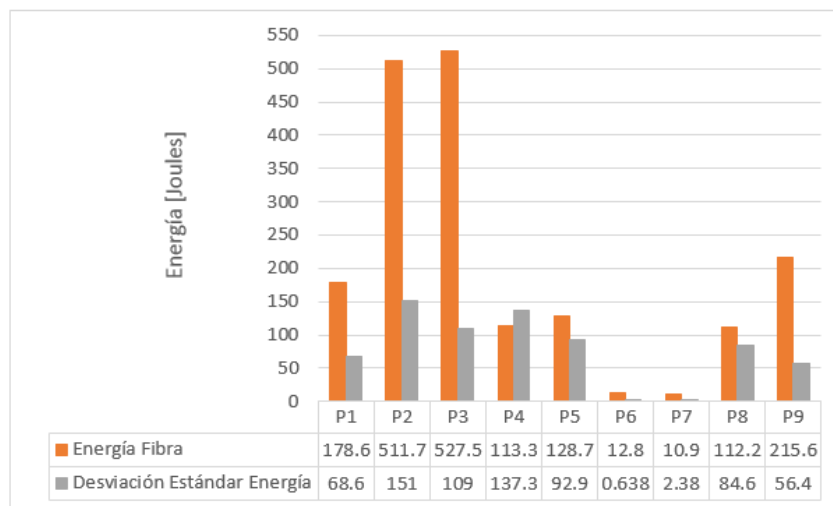


Figura 17. Energía de fractura y desviación estándar de los nueve puntos de prueba, fibra S1.

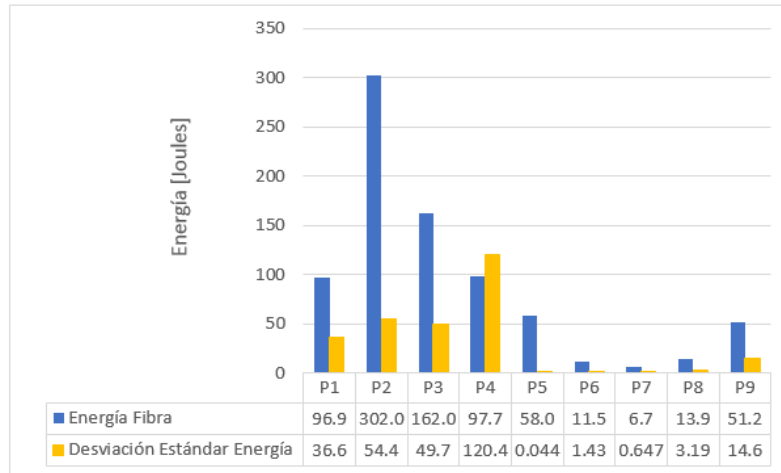


Figura 18. Energía de fractura y desviación estándar de los nueve puntos de prueba, fibra T2.

Se puede observar gráficamente como la energía en la fibra S1 es mayor en su punto máximo un 75% al punto máximo de la fibra T2 (ver Figuras 17 y 18), esto puede atribuir a su longitud, la cual es casi el doble de la segunda. La razón del aumento en la energía de fractura se da por la relación de aspecto de cada una de las fibras, ya que entre mayor sea la longitud de estas, el puente creado entre la grieta se hace más difícil de romper (González Salcedo, 2013) (Bayramov, Taşdemir, & Taşdemir, 2004). En las Figuras 19 y 20, se observa la matriz de concreto reforzado con fibra S1 y T2 respectivamente.



Figura 19. Matriz reforzada con fibra S1.



Figura 20. Matriz reforzada con fibra T2.

3.4 Análisis estadístico

Una vez obtenidos experimentalmente los resultados de módulo de rotura en el laboratorio, se procede a analizar y cuantificar la incidencia de la inclusión de fibras en el concreto. Se analizan las superficies de respuesta a través de la metodología ANOVA.

Se estableció un nivel de significancia estadístico de $\alpha = 0.10$ (o 10%) a criterio de la investigación, con el fin de observar la incidencia de los factores de control (%F vs %CAg), sobre el factor de respuesta a evaluar en este caso módulo de rotura (MR). Las Tablas 4 y 5 muestran los

resultados del análisis de varianza llevado a cabo en el software Minitab V17® (Minitab 17 Statistical Software, 2017) para la fibra y el agregado grueso, donde para cada tipo de fibra se muestran significantes los términos lineales, cuadráticos y de interacciones entre los parámetros estudiados, ver Tablas 4 y 5. Sin embargo, se presenta un porcentaje de falta de ajuste en ambos casos, un modelo de regresión exhibe falta de ajuste cuando no describe adecuadamente la relación funcional entre los factores experimentales y la variable de respuesta, cuando $P\text{-value} < \alpha$, el modelo no se ajusta a los datos (Minitab, 2017). Pese a los esfuerzos técnicos realizados para salir de esta condición de falta de ajuste ($P\text{-value del Lack of fit} < \alpha$), tal como la transformación de datos usando funciones polinómicas, no se logró tal fin, ya que la superficie de respuesta generada es más compleja que el máximo polinomio que soporta el DOE de segundo grado usado.

La falta de ajuste también se presenta por la no planaridad o la curvatura de la superficie de respuesta (Bentur & Mindess, 2007) (Gutiérrez-Pulido & De la Vara-Salazar, 2008). Debido a que el valor de $P\text{-value}$ de la falta de ajuste es $< \alpha$, se dice que el modelo no se ajusta, por lo tanto, se concluye que el modelo no se ajusta con precisión a los datos. Para obtener un mejor modelo, es posible que deba agregar términos o transformar sus datos (Minitab, 2017). Se probó haciendo una transformación de datos con funciones polinómicas, pero no se logró salir de este estado, por lo tanto, un posible futuro esquema de investigación y profundización en esta área de los materiales consistiría en aplicar técnicas matemático-estadísticas más robustas para adaptación topológica a superficies complejas, tales como redes neurales artificiales o similares. Dado la concepción de los presentes experimentos y desarrollo de laboratorio, matemáticamente la solución actual reportada es la mejor opción sin llegar a repetir todo el proceso desde la concepción de los experimentos y modificar los diseños de mezcla.

Debido a que haciendo transformación de datos para los módulos de rotura de las fibras no se

logró salir del estado de falta de ajuste, se decide emplear como variable de respuesta, la energía de fractura. Mediante un proceso iterativo se encontró que con la función logaritmo en base 10 (Log_{10}), se logró salir del estado de falta de ajuste (Lack of Fit) para la fibra T2, sin embargo, pese a los esfuerzos técnicos realizados, la fibra S1 no logra salir de este estado.

Los coeficientes de las ecuaciones que describen la curva de superficie de respuesta para los parámetros incidentes estadísticamente en el modelo, se muestran a continuación en las ecuaciones 2 y 3:

Fibra S1:

$$\text{MR [MPa]} = 1.306 + 0.0635 * \text{CAg} + 1.457 * \text{F} - 0.00246 * \text{CAg}^2 + 1.611 * \text{F}^2 - 0.1394 \text{CAg} * \text{F}. \quad (2)$$

Fibra T2:

$$\text{MR [MPa]} = 0.649 + 0.0152 * \text{CAg} + 3.828 * \text{F} - 1.510 \text{F} * \text{F} - 0.0896 \text{CAg} * \text{F} \quad (3)$$

Tabla 4.

Análisis ANOVA Minitab V17® para módulo de rotura a 14 días fibra (S1).

| | Modelo | | G.L | F -Value | P -Value | Significancia |
|---------------------------------|-----------------|-------------|-----|----------|----------|---------------|
| Módulo de Rotura | Lineal | %CAg | 2 | 37.47 | 0.000 | SI |
| | | %F | 1 | 85.31 | 0.000 | SI |
| Resistencia a Flexión a 14 días | Cuadrático | %CAg * %CAg | 1 | 3.21 | 0.088 | SI |
| | | %F * %F | 2 | 8.59 | 0.008 | SI |
| | Interacción | %CAg * %F | 1 | 14.81 | 0.001 | SI |
| | Falta de ajuste | | 3 | 5.59 | 0.007 | SI |

Tabla 5.

Análisis ANOVA Minitab V17®. Modelo no depurado de los factores, para la Energía [J] transformada con Log10 a 14 días fibra (T2).

| | | Modelo | G.L | F -Value | P -Value | Significancia |
|--|------------------------|-------------|-----|----------|----------|---------------|
| Módulo de Rotura | Lineal | %CAg | 1 | 6.28 | 0.021 | SI |
| | | %F | 1 | 70.09 | 0.000 | SI |
| Resistencia a Flexión a 14 días | Cuadrático | %CAg * %CAg | 1 | 1.08 | 0.312 | NO |
| | | %F * %F | 1 | 3.24 | 0.087 | SI |
| | Interacción | %CAg * %F | 1 | 4.74 | 0.042 | SI |
| | Falta de ajuste | | 4 | 5.59 | 0.545 | NO |

Debido a que un término del modelo de superficie de respuesta para la fibra T2 no resultó estadísticamente significativo, se generó un modelo depurado, cuyo resultado se muestra en la

Tabla 6.

Tabla 6.

Análisis ANOVA Minitab V17®. Modelo depurado de los factores, para la Energía [J] transformada con Log10 a 14 días fibra (T2).

| | | Modelo | G.L | F -Value | P -Value | Significancia |
|--|------------------------|-----------|-----|----------|----------|---------------|
| Módulo de Rotura | Lineal | %CAg | 1 | 6.26 | 0.021 | SI |
| | | %F | 1 | 69.83 | 0.000 | SI |
| Resistencia a Flexión a 14 días | Cuadrático | %F * %F | 1 | 3.79 | 0.065 | SI |
| | Interacción | %CAg * %F | 1 | 4.72 | 0.041 | SI |
| | Falta de ajuste | | 4 | 0.81 | 0.536 | NO |

Las ecuaciones 2 y 3 describen la curva de superficie de respuesta en cada caso, las cuales se observan en las Figuras 21 y 22, respectivamente mostrando la incidencia de los parámetros en el valor de módulo de rotura y la energía de fractura en el caso de la fibra T2. Gráficamente se pueden

ver los diferentes cambios del MR según la dosificación de fibra en cada punto. De igual manera en las Figuras 23 y 24, graficas de contorno, las cuales proporcionan una vista bidimensional en la que todos los puntos que tienen la misma respuesta se conectan para producir líneas de contorno del valor del MR y energía constante. Las gráficas de contorno se utilizan para establecer valores de respuesta y condiciones operativas deseables.

Los contornos son curvos debido a que el modelo contiene términos cuadráticos que son estadísticamente significativos, estas graficas son útiles para establecer los valores de respuesta buscados. Los valores más altos del MR para la inclusión de fibra se dan en la parte superior izquierda, que coinciden con los valores más bajos de retiro de agregado grueso. Se predice un módulo de rotura a la flexión mayor o igual a 4.0 [MPa].

En ambos tipos de fibra, del grafico de contorno se obtuvieron los valores más altos del módulo de rotura en los picos de la curva, de igual manera se consiguieron los porcentajes de dosificación de fibra y agregado grueso para obtener estos módulos.

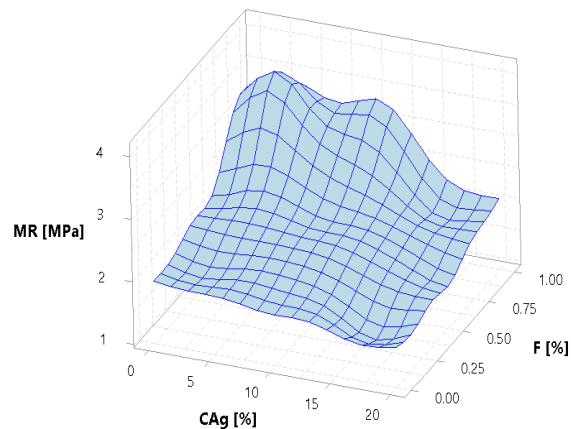


Figura 21. Superficie de respuesta del módulo de rotura a una edad de curado de 14 días, fibra S1.

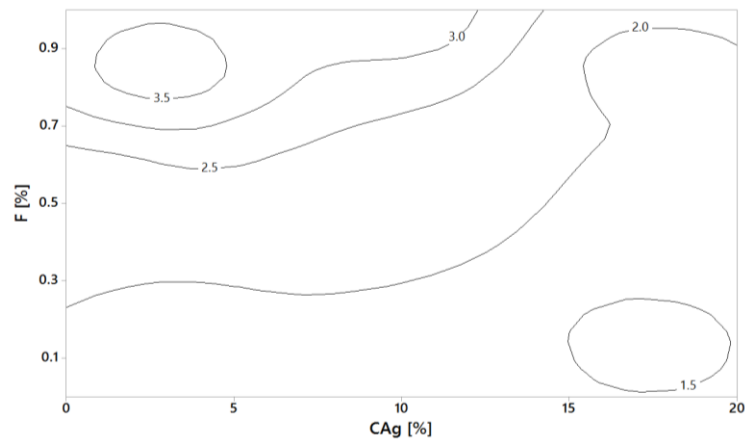


Figura 22. Gráfica de contorno del módulo de rotura en función del contenido de fibra y retiro de agregado grueso a una edad de curado de 14 días, fibra S1.

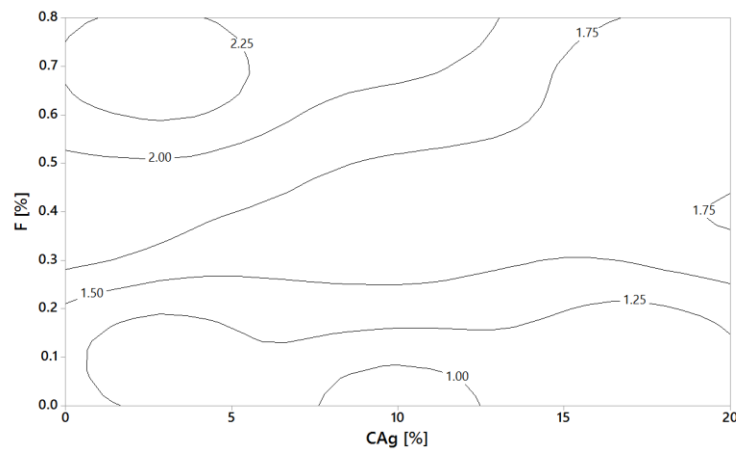


Figura 23. Gráfica de contorno de la energía transformada con Log_{10} en función del contenido de fibra y retiro de agregado grueso a una edad de curado de 14 días, fibra T2.

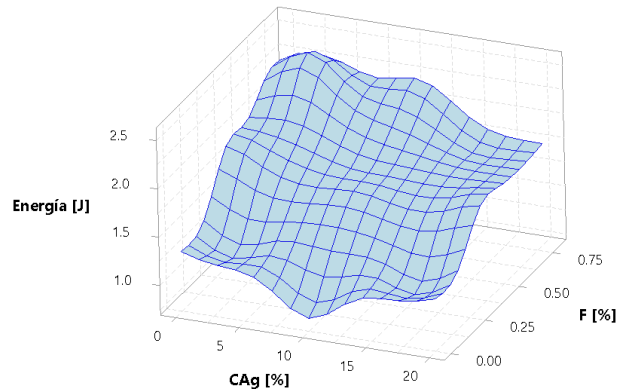


Figura 24. Superficie de respuesta de la energía transformada con Log₁₀ a una edad de curado de 14 días, fibra T2.

Una vez obtenidos los porcentajes óptimos de mezcla, desde la variable respuesta módulo de rotura para cada fibra, da como resultado para la fibra S1 con un 2.5% de retiro de agregado grueso y un 0.9% de inclusión de fibra, se obtiene este punto máximo. De igual forma, para la fibra T2, se encuentra con 3.0% de agregado grueso y 0.7% de fibra. Se procedió a realizar los diseños de mezcla óptimos y a las pruebas de laboratorio para encontrar el módulo de rotura de estos especímenes. Se encontró una carga máxima resistida de 20.3 [kN] para la prueba S1 y de 17.9 [kN] para T2. Esto sigue afirmando que la primera fibra mejora un grado más las propiedades del concreto que la segunda, esto según los materiales usados y las condiciones experimentales.

En el momento de calcular los módulos de rotura para las pruebas, se encontró una incongruencia entre los valores teóricos encontrados y los obtenidos experimentalmente en el laboratorio, ya que el promedio de los módulos fueron respectivamente para la fibra S1 y T2 de 2.8 y 2.5 (MPa), con una desviación estándar de 0.24 y 0.17 para cada una, estas mezclas presentaron una resistencia a la compresión de 13.4 y 12.2 (MPa). Estos módulos no llegaron a ser los predecidos de 4.0 (MPa). Finalmente se simuló el proceso de prefabricado, repitiendo las

mezclas óptimas con un 3.0% de acelerante de fraguado, con módulos de rotura a una edad de curado de 3 días de 1.2 y 1.4 (MPa), con desviaciones de 0.14 y 0.12. En las Figuras 25 y 26 se observa la curva desplazamiento vs fuerza axial para las mezclas óptimas, gráficas arrojadas por la MTS (M. S. Corporation) en función de la carga aplicada sobre la viga, dónde en cada caída se observa la pérdida de rigidez a medida que falla la matriz cementicia y cada una de las fibras, se ve el trabajo de la fibra, la cual permite seguir soportando carga sin que se presente una falla súbita como sucede con el concreto simple (ver Figura 27).

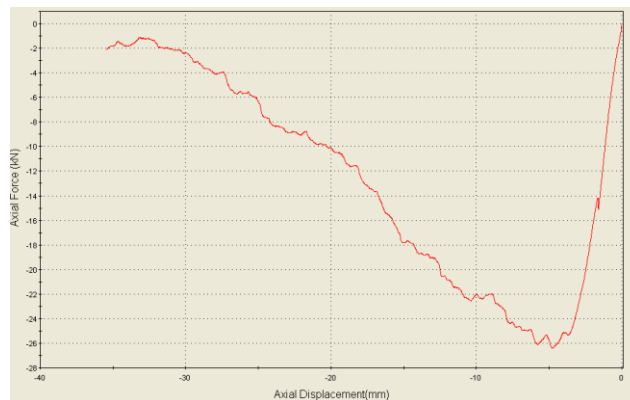


Figura 25. Curva desplazamiento vs fuerza axial de la mezcla óptima para la fibra S1

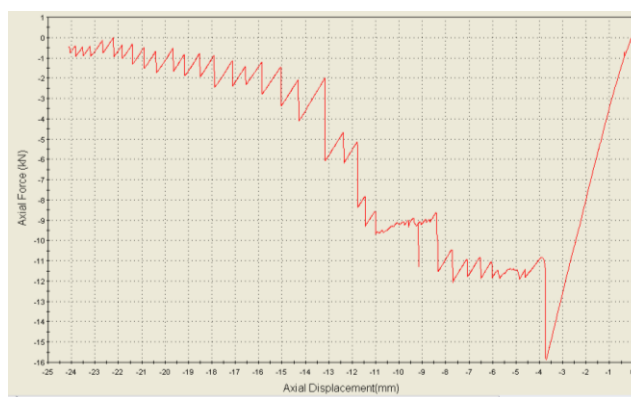


Figura 26. Curva desplazamiento vs fuerza axial de la mezcla óptima para la fibra T2.

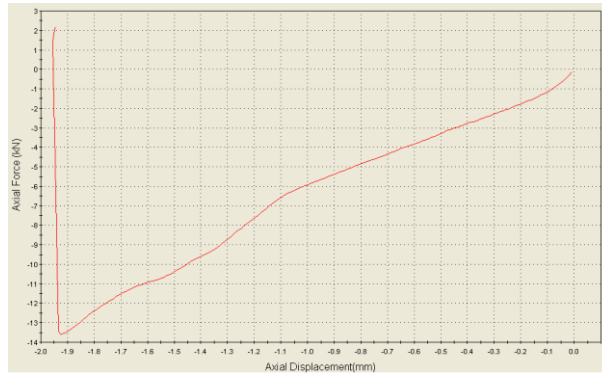


Figura 27. Curva desplazamiento vs fuerza axial de mezcla de concreto simple. Fuente. Autor

4. Costos por m³ de mezcla de concreto reforzado con fibra

A continuación, se presentan las Tablas 10, 11 y 12, costo de la producción de 1 m³ de mezcla de concreto reforzado con fibras y concreto simple. Enseguida, se especifican los contenidos de las mezclas óptimas desde la variable respuesta módulo de rotura.

S1: La mezcla contiene un retiro de agregado grueso de 2.5% y un 0.9% de inclusión de fibra.

T2: Esta mezcla contiene un retiro de agregado grueso de 3.0% y 0.7% de inclusión de fibras.

Ambas con un contenido de cemento de 300 kg por m³. Los precios de la fabricación de estos concretos resultan cercanos, difieren en el precio del tipo de fibra y de la presentación en el mercado de ellas.

Tabla 7.

Precio m³ concreto reforzado con fibra S1.

| Material | Cantidad [m ³] | Unidad de medida | Precio Unitario | Precio Parcial |
|---------------------|-------------------------------|---------------------|------------------------|-------------------|
| Cemento | 300.000 | kg | \$ 0.406 | \$ 121.800 |
| Agregado Grueso | 894.970 | kg | \$ 0.039 | \$ 35.000 |
| Agregado Fino | 761.710 | kg | \$ 0.033 | \$ 25.000 |
| Plastificante | 3.570 | kg | \$ 2.472 | \$ 8.824 |
| Fibra | 8.190 | kg | \$ 22.780 | \$ 186.568 |
| Precio Total | | | 1 m³ | \$ 377.192 |

Tabla 8.

Precio m³ concreto reforzado con fibra T2.

| Material | Cantidad [m ³] | Unidad de medida | Precio Unitario | Precio Parcial |
|---------------------|-------------------------------|---------------------|------------------------|-------------------|
| Cemento | 300.000 | kg | \$ 0.406 | \$ 121.800 |
| Agregado Grueso | 894.970 | kg | \$ 0.039 | \$ 35.000 |
| Agregado Fino | 761.710 | kg | \$ 0.033 | \$ 25.000 |
| Plastificante | 3.570 | kg | \$ 2.472 | \$ 8.824 |
| Fibra | 8.190 | kg | \$ 24.752 | \$ 202.715 |
| Precio Total | | | 1 m³ | \$ 393.339 |

Tabla 9.

Precio m³ concreto simple, mezcla P0.

| Material | Cantidad [m ³] | Unidad de medida | Precio Unitario | Precio Parcial |
|---------------------|-------------------------------|---------------------|------------------------|-------------------|
| Cemento | 300.000 | kg | \$ 0.406 | \$ 121.800 |
| Agregado Grueso | 959.660 | kg | \$ 0.036 | \$ 35.000 |
| Agregado Fino | 721.140 | kg | \$ 0.035 | \$ 25.000 |
| Plastificante | 3.570 | kg | \$ 2.472 | \$ 8.824 |
| Precio Total | | | 1 m³ | \$ 190.624 |

5. Conclusiones

Esta investigación estudió mezclas de concreto reforzado con dos tipos de fibras sintéticas con dominios entre 0% y 1% para la fibra codificada S1 y de 0% y 0.8% para la fibra denominada T2, porcentajes en volumen total de la mezcla, por medio de un diseño estadístico multi-variable del tipo central compuesto desde puntos axiales basado en un factorial 2^k con puntos al centro conjunto a la metodología de superficie de respuesta y a un análisis ANOVA, utilizando un nivel de significancia de $\alpha = 0.10$. A partir de los resultados obtenidos de la resistencia a la flexión (módulo de rotura y energía de fractura) a una edad de curado de 14 días, se pueden hacer las siguientes conclusiones:

❖ Siguiendo la metodología estadística del análisis multivariable (ANOVA), se encontraron significativos los resultados del módulo de rotura en presencia de fibra sintética, donde los parámetros lineales, cuadráticos y de interacción entre la inclusión de fibra y retiro de agregado grueso resultan ser muy incidentes en la variable respuesta MR y energía de fractura.

❖ La adición de fibras en el concreto resulta ser muy beneficioso de modo que estas ayudan a aumentar su ductilidad, reducen la fisuración y generan un puente entre la grieta del concreto, este efecto se observa evidentemente en fibras de mayor longitud, aumentando la tenacidad, por lo cual, la fibra S1 resulta dar mejores resultados ya que su longitud es mayor a T2 y presenta un aumento significativo del 75% en la energía de fractura (tenacidad).

❖ Se cuantificó el precio de los materiales por metro cúbico de las mezclas óptimas para cada fibra, dando como resultado una ligera diferencia en el precio de las fibra reforzadas y un aumento al doble de una mezcla simple, ya que difieren en la presentación disponible en el mercado.

❖ Este proyecto fue financiado por el Cluster de la Construcción de la Cámara de Comercio de Bucaramanga y uno de los objetivos empresariales era reproducir en campo los principales hallazgos acá encontrados, por tal motivo simulando el proceso de prefabricado, se realizaron las mezclas óptimas con un 3% de acelerante de fraguado, dando resultados satisfactorios en campo.

Referencias bibliográficas

- ACI 211.1, (2007). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete de ACI Manual of Concrete Practice.
- Bayramov, Taşdemir, and Taşdemir. (2004). Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method, *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, no. 6, p. 665–675.
- Bentur A. and Mindess, S. (2007). Synthetic fibres, in *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, 2nd ed., New York, p. 60.
- Brandt, A. M. (2008). Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering, *Compos. Struct.*, vol. 86, no. 1–3, p. 3–9.
- Cerezo, W. B. (2012). *Fibras de Polipropileno para reforzamiento de matrices cementicias*. Universidad Nacional de Colombia, Palmira, p. 1–22.
- Destree X. and Naaman A. (2007). *ACI Committee 544 Fiber Reinforced Concrete*, p. 16–19.
- González Salcedo, L.O. (2013). *Componentes Del Concreto Reforzado Con Fibras En Sus Propiedades Mecánicas*, Univ. Nac. Colomb. Sede Palmira.
- Gopalaratnam V.S. Shah S.P. (1986). Properties of steel fiber reinforced concrete subjected to impact load *ACI Materials Journal*, January, February. p. 117-126.
- Gutiérrez-Pulido H. and De la Vara-Salazar R. (2008). *Diseños factoriales 2k, Análisis y diseño de experimentos*.
- Hasaba, Kawamura, Koizumi and Takemoto, (1984). Resistibility against impact load and deformation characteristics under bending load in polymer and hybrid (polymer and steel) fiber reinforced concrete, in G.C. Hoff (ed.) *Fiber Reinforced Concrete*, ACI SP-81, American

- Concrete Institute, Farmington Hills, MI, p. 187–196.
- Hermida G., Garzón O., Lamilla G. (2006). Concreto de 190 MPa (27685 psi) nuevo récord de resistencia en Colombia Boletín del ACI #7. p.4-9.
- I. M. del C. y el C. IMCYC. (2007). Concreto reforzado con fibras, El concreto en la obra Probl. causas y soluciones. p. 70.
- I. N. V. E. – 414 – 07. (2000). Resistencia a la flexión del concreto método de la viga simple cargada en los tercios de la luz., no. Em. p. 1–6.
- Incontec, (2005). Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión. Norma Tec. Colombiana. 2871.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC. (1992). Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto. Normas Técnicas Colombiana 396.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC. (1994). Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados. Norma Técnica Colombiana 1776.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC. (1995). Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso. Norma Técnica Colombiana 176-237.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC. (1995). Ingeniería civil y arquitectura. Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino. Norma Técnica Colombiana 237.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC. (2000). Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto. Norma Técnica Colombiana 174.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC. (2007). Concretos. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. Norma Técnica Colombiana 77.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC. (2008). Concretos. Aditivos químicos para concreto. Norma Técnica Colombiana 1299.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC. (2010). Ingeniería civil y arquitectura. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio. Norma Técnica Colombiana 1377.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC. (2011). Ingeniería civil y arquitectura. Cementos. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico. Norma Técnica Colombiana 221.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC. (2014). Cementos. Cuartos de mezclado, cámaras y cuartos húmedos y tanques para el almacenamiento de agua, empleados en los ensayos de cementos hidráulicos y concretos. Norma Técnica Colombiana 3512.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC. (2014). Especificación de desempeño para cemento hidráulico, Norma Técnica Colombiana 121.

INVIAS. (2007). Contenido aproximado de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos (I.N.V.E - 212 - 07). p. 6–8.

M. S. Corporation. MTS TestSuite™ TW Software.

MATLAB version 7.10.0. (2017). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., @ Es.Mathworks.Com.

Minitab 17 Statistical Software. (2017). State College, Copyright © 2017 Minitab Inc, Disponible en: www.minitab.com.

Minitab, “Lack of Fit,” Copyright ©. (2017). Minitab Inc. Disponible en:

https://support.minitab.com/enus/minitab/18/help-andhowto/modelingstatistics/regression/supporting_topics/regression-models/lack-of-fit-and-lack-of-fit-tests/

Norma Técnica Colombiana NTC 454. (2011). Ingeniería civil y arquitectura. Concreto fresco-toma de muestras.

Spadea G. and Frigione G. (1987). Mechanical and rheological behaviour of polypropylene fibre reinforced concrete, *Il Cemento*. 2. p. 173–185.

Van Chanh, N. (2005). Steel fiber reinforced concrete. In: Proceedings of JSCE – VIFCEA Joint Seminar on Concrete Engineering in Vietnam and Workshop, Ho Chi Minh City University of Technology. SAKAI, K.; VAN CHANH, N. Ho Chi Minh City, Vietnam, December 8-9. 08-116. Publicated on line by Concrete Committee, Japan Society Civil Engineering, Newsletter, no. 5, April, 2006, Tokyo, Japan.